УДК 621.793.18:536.2.083 Научная статья

https://doi.org/10.32603/2071-8985-2025-18-8-16-27

Термоэлектронная эмиссия при магнетронном распылении горячей мишени

В. И. Шаповалов✉, Д. С. Шарковский

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

✉ vishapovalov@mail.ru

Аннотация. Исследуется влияние латерального распределения вдоль поверхности температуры горячей мишени сбалансированного магнетрона на его вольтамперную характеристику (ВАХ). Исследование основано на анализе результатов измерения ВАХ магнетрона диаметром 130 мм с горячей титановой мишенью, распыляемой в инертной среде. Установлено, что независимо от давления рабочего газа при увеличении тока возникает переход разряда в дуговую стадию. Причиной этого эффекта служит возрастание термоэлектронной эмиссии до значимого уровня. Для моделирования эмиссионного процесса использована дифференциальная методика. Она основана на известном латеральном распределении температуры мишени, для численной оценки которой был использован модуль «Теплопередача» пакета COMSOL Multiphysics. Работа относится к фундаментальным исследованиям газового разряда постоянного тока с горячим катодом, на которую наложено магнитное поле. Полученные результаты могут найти практическое применение при разработке технологии осаждения пленок металлов и их сплавов.

Ключевые слова: магнетрон, горячая мишень, титан, вольтамперная характеристика, термоэлектронная эмиссия, тлеющий разряд, дуговой разряд

Для цитирования: Шаповалов В. И., Шарковский Д. С. Термоэлектронная эмиссия при магнетронном распылении горячей мишени // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2025. Т. 18, № 8. С. 16–27. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-8-16-27.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

Thermoelectronic Emission in Magnetron Sputtering of a Hot Target

V. I. Shapovalov✉, D. S. Sharkovskii

Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

✉ vishapovalov@mail.ru

Abstract. The aim of this work is to study the effect of the lateral distribution of the surface temperature of a hot balanced magnetron target on its current-voltage characteristic. The study is based on the analysis of the results of measuring the current-voltage characteristics of a balanced magnetron with a diameter of 130 mm with a hot titanium target sputtered in an inert medium. It was found that, regardless of the working gas pressure, an increase in current causes a transition of the discharge to the arc stage. The reason for this effect is an increase in thermionic emission to a significant level. A differential technique was used to model the emission process. It is based on the known lateral distribution of the target temperature, for the numerical evaluation of which the Heat Transfer module of the COMSOL Multiphysics package was used. The work relates to fundamental studies of a DC gas discharge with a hot cathode on which a magnetic field is applied. The results obtained can find practical application in the development of a technology for depositing films of metals and their alloys.

Keywords: magnetron, hot target, titanium, volt-ampere characteristic, thermionic emission, glow discharge, arc discharge

For citation: Shapovalov V. I., Sharkovskii D. S. Thermoelectronic Emission in Magnetron Sputtering of a Hot Target // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2025. Vol. 18, no. 8. P. 16–27. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-8-16-27.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Введение. Методы магнетронного распыления до сих пор привлекают большое внимание специалистов [1]–[5]. На рис. 1 показаны результаты поиска в базе данных ScienceDirect по ключевым словам «sputtering» и «reactive sputtering». Истоки магнетронного распыления относят к 1939 г., когда появился патент на устройство, описывавший многие ключевые особенности современного магнетронного распыления [6]. И только в 1960-х гг. начались его исследования [7]–[10], причем к первой публикации об этом методе относят статью [7], где опубликованы исследования магнетрона с алюминиевой мишенью, работающего на постоянном токе.

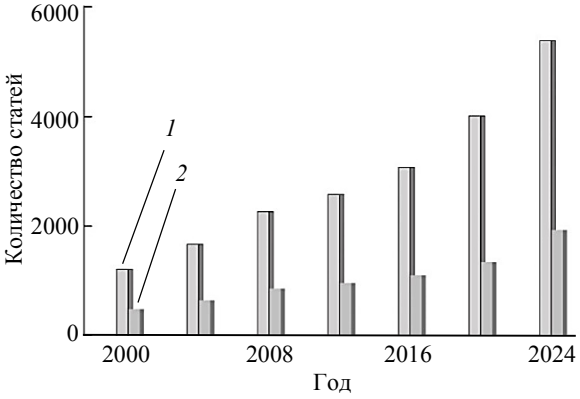


Рис. 1. Статьи: *1* – о магнетронном распылении; *2* – реактивном магнетронном распылении (по данным базы ScienceDirect)
Fig. 1. Articles: *1* – on magnetron sputtering; *2* – reactive magnetron sputtering (according to ScienceDirect database)

Развитие техники магнетронного распыления привело к появлению разновидностей, отличающихся питающим напряжением:

– высокочастотное магнетронное распыление [4], [11]–[15];

– магнетронное распыление на постоянном токе [16]–[21];

– импульсное магнетронное распыление на постоянном токе [22], [23];

– высокомощное пульсирующее магнетронное распыление [24]–[27];

– высокомощное импульсное магнетронное распыление [5], [28]–[32].

Хорошо изученные и широко применяемые магнетронные распылительные устройства обычно содержат охлаждаемую мишень. Стремление к совершенствованию методов распыления, направленное, например, на повышение скорости процесса, привело к появлению модифицированных распылительных систем, содержащих, в частности, магнетрон с горячей мишенью [33]–[36]. Максимальная температура поверхности холодной мишени сбалансированного магнетрона при мощности разряда 100 Вт обычно не превышает 800 °С [37]. Магнетрон с горячей мишенью содержит распыляемый узел (рис. 2), в котором относительно тонкая (толщиною 1…3 мм) мишень *2* охлаждается по элементам конструкции и через пластину-холодильник *4*. Поэтому температура мишени может быть доведена до точки плавления. Результаты исследований таких магнетронов можно найти в [38]–[45], где содержатся обширные списки цитируемой литературы.

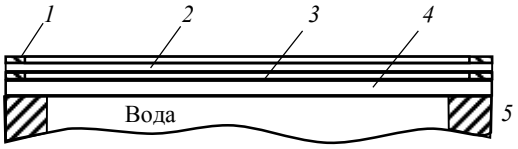


Рис. 2. Схематическое изображение распыляемого узла магнетрона с горячей мишенью: *1* – прижимное кольцо; *2* – внешняя пластина (мишень); *3* – промежуточное кольцо; *4* – внутренняя пластина (холодильник); *5* – корпус магнетрона
Fig. 2. Schematic representation of the sputtering unit of the magnetron with a hot target: *1* – pressure ring; *2* – outer plate (target); *3* – intermediate ring; *4* – inner plate (cooler); *5* – magnetron housing

У магнетрона с холодной металлической мишенью, работающего в среде инертного газа на постоянном токе, вольтамперная характеристика (ВАХ) в области токов более 2 А слабо отклоняется от прямой пропорциональности. Обычно ВАХ таких магнетронов во всем диапазоне токов аппроксимируют в виде [46]

$$U = kI^n, \quad (1)$$

где k и n – постоянные, которые служат подгоночными параметрами.

В отличие от (1) ВАХ магнетрона с горячей мишенью содержит максимум [47]. В области увеличения напряжения магнетрон работает в режиме аномального тлеющего разряда. При достижении экстремума режим горения разряда переходит в дуговую стадию.

Одной из возможных причин появления максимумов на обсуждаемых ВАХ, установленных в наших исследованиях, служит значимая термоэлектронная эмиссия мишени [47]. Прежде чем продвигаться дальше, обратим внимание на терминологию. Мишень, о которой здесь идет речь, – это фактически узел, содержащий несколько элементов (см. рис. 2). В нем нагревается и может быть источником электронов только внешняя пластина. Термины «температура мишени» или «эмиссия мишени» нужно понимать именно в таком смысле. Они используются нами исключительно ради удобства.

Ранее в [47] для вычисления плотности тока термоэлектронной эмиссии мишени нами была использована интегральная оценка ее температуры. Вычисления температуры были выполнены по экспериментальным спектрам излучения мишени в ближнем ИК-диапазоне [33]. Погрешность такой методики может быть достаточно высокой, что связано, в первую очередь, с тем, что для измерения спектра излучения разряда использован оптоволоконный спектрометр, на входной зрачок которого поступает сигнал с участка мишени площадью не более 4 мм^2. А общая площадь мишени, нагретой до высокой температуры, может быть равна нескольким десяткам квадратных сантиметров. При равномерно нагретой мишени вопрос о погрешности не мог вызвать трудности, однако мишень сбалансированного магнетрона нагрета неравномерно. Латеральное (вдоль поверхности) распределение температуры поверхности мишени задается конфигурацией магнитного поля в магнетроне. Это распределение нужно учесть при изучении эмиссионной способности нагретой мишени.

Целью исследований, описанных в данной статье, служит изучение влияния латерального распределения температуры поверхности горячей мишени сбалансированного магнетрона на его ВАХ. Исследования выполнены на примере магнетрона с горячей титановой мишенью. Для моделирования теплового процесса на мишени использован модуль «Теплопередача» пакета COMSOL Multiphysics.

Эксперименты. Измерения ВАХ магнетрона с горячей титановой мишенью выполнены в высоковакуумной системе, имеющей камеру объемом 0.076 м^3, паромасляный диффузионный и пластинчато-роторный механический насосы с номинальной быстротой действия 0.3 м^3/с и 0.005 м^3/с, соответственно. Остаточное давление в ней не превышало $5 \cdot 10^{-2}$ мторр. Для создания рабочей газовой среды использован аргон высокой чистоты. Сбалансированный магнетрон диаметром 130 мм установлен в окне вакуумной камеры. Работу магнетрона на постоянном токе обеспечивал высокостабильный источник постоянного тока. Исследования ВАХ выполнены в диапазоне токов 0.5…5.0 А при давлении аргона 2…6 мторр. При этом на магнетрон устанавливали распыляемый узел, содержащий внешнюю титановую пластину толщиною 1 мм, охлаждаемая через зазор 1 мм от внутренней холодной медной пластины толщиною 4 мм и по элементам крепления (рис. 2). Экспериментально установленная кольцевая распыляемая область на титановых пластинах имела площадь 36.5 см^2 с радиусами внутренней и внешней областей 19 и 39 мм соответственно.

Вольтамперные характеристики. На рис. 3, *а* показаны ВАХ магнетрона, содержащие максимумы. Такая особенность типична для всех исследованных нами тугоплавких металлов, отно-

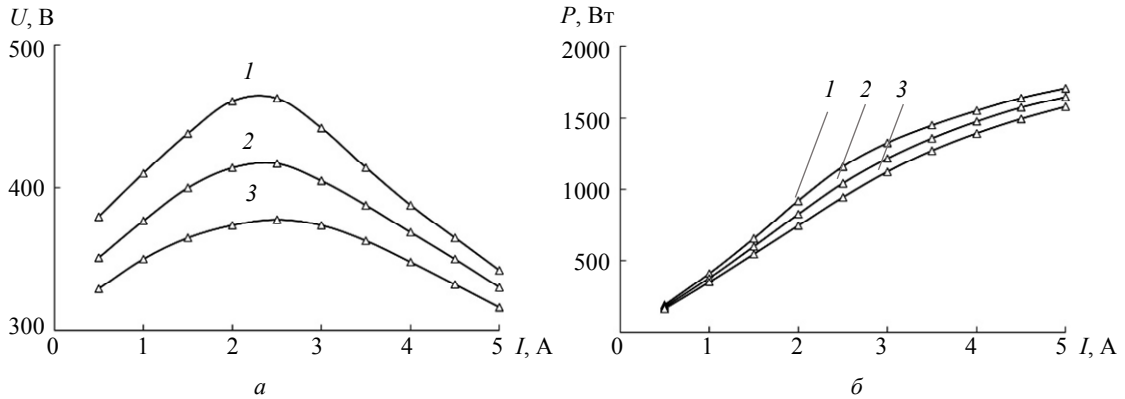


Рис. 3. ВАХ (*а*) и мощность разряда (*б*) магнетрона с горячей титановой мишенью при давлении аргона (мторр): *1* – 2.0; *2* – 4.0; *3* – 6.0
Fig. 3. I–V characteristics (*a*) and discharge power (*б*) of a magnetron with a hot titanium target at argon pressure (mTorr): *1* – 2.0; *2* – 4.0; *3* – 6.0

сящихся к расширенной группе, в которую входят Ti, Cr, V и др. Зависимости мощности разряда от тока (рис. 3, *б*) свидетельствуют о том, что она не превышает 2000 Вт, независимо от давления аргона. При этом наибольший интерес представляет область максимума, в которой мощность разряда не превышает 1200 Вт.

С помощью интегральной методики, о которой речь пойдет далее, определили, что причиной появления максимумов в ВАХ горячих мишеней при токе разряда более 2.0 А служит возрастание тока термоэлектронной эмиссии до значимого уровня [47], [48]. При вычислениях была использована известная формула Ричардсона–Дэшмана, задающая плотность тока эмиссии $j_{\mathrm{T}e}$, в А/см^2:

$$j_{\mathrm{T}e}(T_t) = AT_t^2 \exp\left(-\frac{e\varphi_t}{kT_t}\right), \tag{2}$$

где T_t – температура мишени, К; $A \approx 120$ А × × см$^{-2}$ · К$^{-2}$ – постоянная; $e = 1.6 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд электрона; φ_t – работа выхода электронов для материала мишени, эВ; $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана.

Если учесть площадь участка мишени F, создающую эмиссионные токи, то ток эмиссии $I_{\mathrm{T}e}(T_t)$ с учетом (2) будет равен:

$$I_{\mathrm{T}e}(T_t) = AFT_t^2 \exp\left(-\frac{e\varphi_t}{kT_t}\right). \tag{3}$$

Величина (3) вносит вклад в ток разряда магнетрона I:

$$I = I_i + I_{ie} + I_{\mathrm{T}e} = (1+\gamma)I_i + I_{\mathrm{T}e}, \tag{4}$$

где I_i – ионный ток; I_{ie}, γ – ток и коэффициент ионно-электронной эмиссии. Выразим из (4) ионный ток:

$$I_i = \frac{I - I_{\mathrm{T}e}}{1+\gamma}. \tag{5}$$

Используя (5), ток ионно-электронной эмиссии I_{ie} с учетом равенства $I_{ie} = \gamma I_i$ можно выразить в виде

$$I_{ie} = \frac{\gamma(I - I_{\mathrm{T}e})}{1+\gamma}. \tag{6}$$

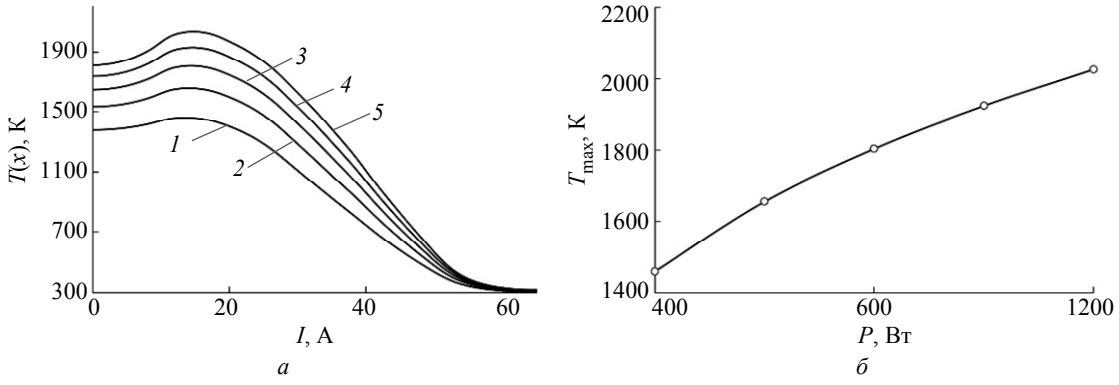
В качестве критерия значимости тока термоэлектронной эмиссии на разряд в [47] было принято относительное изменение тока, в котором при преобразовании учтено выражение (6):

$$\alpha = \frac{I_{ie} + I_{\mathrm{T}e}}{I_{ie}} = \frac{\gamma I + I_{\mathrm{T}e}}{\gamma\left(I - I_{\mathrm{T}e}\right)}. \tag{7}$$

Модель теплового процесса в распыляемом узле. Ранее при моделировании теплового процесса в распыляемом узле, нами численно было решено нестационарное однородное уравнение Фурье. С деталями этих исследований, включающих описание геометрической модели распыляемого узла, краевых условий задачи и некоторых результатов, можно ознакомиться в [49]. В ней нас интересует стационарный случай, для которого справедливо уравнение Фурье в виде

$$a^2 \Delta T_t(x, y) = 0, \tag{8}$$

где x и y – координаты на поверхности нагретой титановой мишени; a, м^2/с – коэффициент ее температуропроводности. Геометрическая модель узла, показанного на рис. 2, и граничные условия для уравнения (8) ничем не отличаются от приведенных в [49]. Поэтому перейдем далее к анализу результатов решения уравнения (8), выполненного с использованием данных из [49].



а *б*

Рис. 4. Латеральное распределение температуры мишени (*а*) при $y = 0$ и $x > 0$ при мощности (в Вт): *1* – 400; *2* – 600; *3* – 800; *4* – 1000; *5* – 1200 и максимальное значение $T_{\max}$ функции $T(x, y)$ (*б*) при $y = 0$ и $x = 14$ мм

Fig. 4. Lateral distribution of target temperature (*a*) at $y = 0$ and $x > 0$ at power (in W): *1* – 400; *2* – 600; *3* – 800; *4* – 1000; *5* – 1200 and maximum value $T_{\max}$ of function $T(x, y)$ (*б*) at $y = 0$ and $x = 14$ mm

Установлено, что при заданной мощности разряда латеральное распределение температуры титановой мишени $T(x, y)$ представляет собой криволинейную поверхность. Она подобна холму с неглубоким кратером в центре. Для примера на рис. 4, *а* приведены проекции сечения поверхности $T(x, y)$ при $y = 0$ на плоскость Tx для $x \geq 0$. Поскольку задача носит осесимметричный характер, кривые на рис. 4, *а* достаточны для того, чтобы получить представление об особенностях функции $T(x, y)$.

Из рис. 4, *а* следует, что зависимость $T(x, y)$ имеет глобальный максимум, лежащий на окружности с радиусом 14 мм, расположенной вне кольцевой распыляемой области мишени ближе к ее центру. Значения максимальной температуры $T_{\max}$ изменяются при увеличении мощности разряда в диапазоне 400…1200 Вт примерно от 1500 до 2000 К (рис. 4, *б*).

Нагреваемая потоком ионов мишень служит источником электронов. В соответствии с формулой (3) ток термоэлектронной эмиссии нелинейно зависит от температуры. Наиболее просто термоэлектронный ток можно оценить с помощью интегральной методики. Она основана на допущении о равномерном распределении $T(x, y)$ в заданной области поверхности мишени, имеющей площадь F. При таком подходе основная величина – это эффективная температура $T_{\text{эф}}$:

$$T_{\text{эф}} = \frac{1}{F}\iint_F T(x, y)dx\,dy. \qquad (9)$$

В этом случае выражение (3) принимает вид

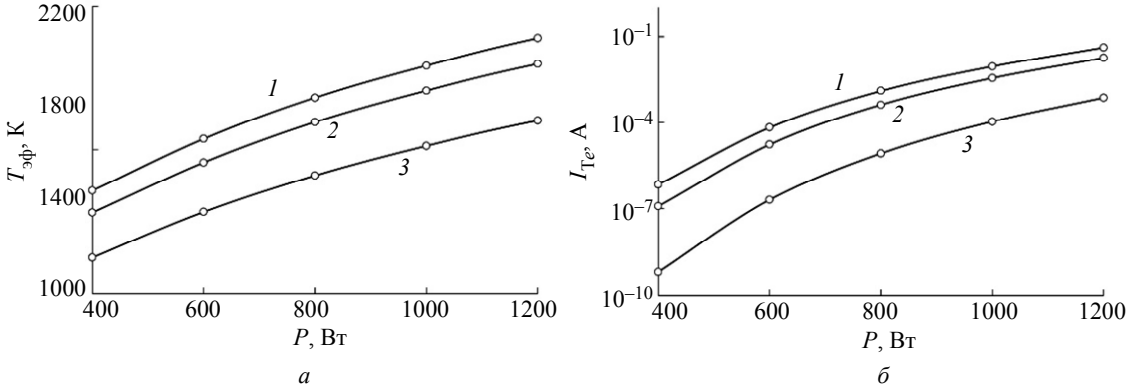
$$I_{\text{Te}}(T_{\text{эф}}) = AFT_{\text{эф}}^2 \exp\left(-\frac{e\varphi_t}{kT_{\text{эф}}}\right). \qquad (10)$$

Главная сложность методики, основанной на (9) и (10), состоит в неопределенности выбора нагретой области поверхности мишени. На рис. 5, *а* показано влияние мощности разряда и диаметра области, выбранной в качестве эмиттера электронов, на ее температуру, вычисленную по распределениям, приведенным на рис. 4, *а*, и на ток эмиссии (рис. 5, *б*).

Из рис. 5 видно, что интегральная оценка имеет высокую неопределенность. Области, выбранные в качестве эмиттера, имеющие диаметры 60 и 80 мм, создают токи в изучаемом диапазоне мощности, различающиеся примерно в 3–5 раз.

Рассмотрим другую методику, которую назовем дифференциальной. Представим поверхность нагретой мишени в виде совокупности концентрических фигур. Центральная область при $x = 0$ и $y = 0$ – это диск с радиусом r_1. Все последующие имели форму концентрического кольца с внутренним и внешним радиусами r_i и r_{i+1} при $i = 1, 2, \ldots, N–1$, соответственно. Изучение этой модели удобнее рассматривать в цилиндрической системе координат, представив распределение $T(x, y)$ в виде $T(r, \varphi)$, где координаты x и y на поверхности мишени заменены радиусом-вектором $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ и полярным углом $\varphi = \text{arctg}(y/x)$. Поскольку распределение $T(r, \varphi)$ осесимметричное, его можно рассматривать без учета угла φ и записать в виде $T(r)$. Поэтому на рис. 4, *а* координату x можно безболезненно заменить радиусом-вектором r.

Основное допущение дифференциальной методики состоит в том, что латеральное распределение температуры $T(r)$ каждой i-й фигуры равномерно и имеет интенсивность



а *б*

Диаметр области, мм: *1* – 60; *2* – 80; *3* – 100

Рис. 5. Эффективная температура поверхности титановой мишени (*а*) и соответствующий ток эмиссии (*б*) при работе выхода 4.15 эВ [33]
Fig. 5. Effective surface temperature of the titanium target (*a*) and the corresponding emission current (*б*) at a work function of 4.15 eV [33]

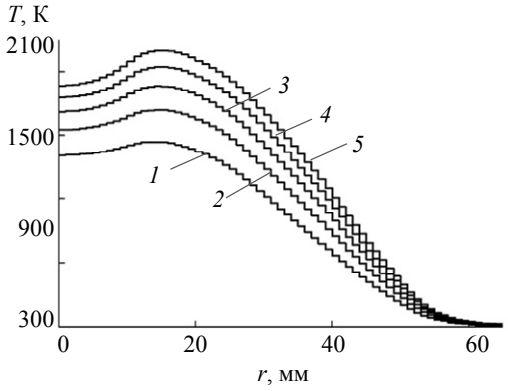
$$T_i = \frac{T(r_{i+1}) + T(r_i)}{2}, \qquad (11)$$

где $T(r_{i+1})$ и $T(r_i)$ – значения температуры на границах фигуры.

Для отыскания значений r_i и T_i, $i = 1, 2, \ldots, N–1$ была выполнена ступенчатая аппроксимация зависимости $T(r)$. При вычислениях было учтено, что $r_i + 1 \le 65$ мм. Для центрального круга с радиусом r_1 выражение (11) приняло вид

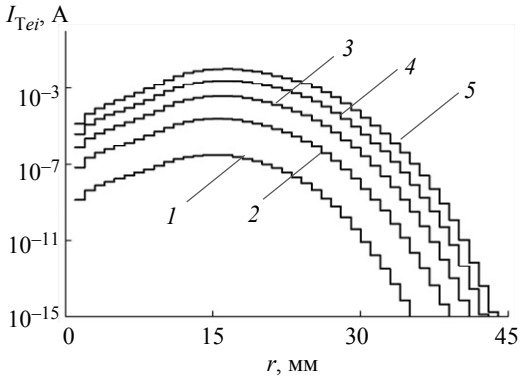
$$T_1 = \frac{T(0) + T(r_1)}{2}, \qquad (12)$$

где $T(0)$ – расчетное значение температуры в центре мишени (см. рис. 4, *а* при $x = 0$).



Мощность разряда, Вт: *1* – 400; *2* – 600; *3* – 800; *4* – 1000; *5* – 1200

Рис. 6. Ступенчатая аппроксимация распределений с рис. 4, *а*
Fig. 6. Stepwise approximation of distributions from fig. 4, *a*



Мощность разряда, Вт: *1* – 400; *2* – 600; *3* – 800; *4* – 1000; *5* – 1200

Рис. 8. Основная часть распределения тока термоэлектронной эмиссии в плоскости мишени
Fig. 8. The main part of the distribution of thermionic emission current in the target plane

Построим далее методику вычисления тока термоэлектронной эмиссии мишени, используя предложенную модель. Результаты ступенчатой аппроксимации кривых с рис. 4 с учетом (11) и (12) приведены на рис. 6. Аппроксимация выполнена с равномерным шагом 1 мм, что обеспечило относительную погрешность менее 2 %. Каждый i-й фрагмент мишени имеет площадь F_i, $i = 0, 1, 2, \ldots, N–1$ ($i = 0$ соответствует центральному кругу). Изменение этой величины по направлению от центра ($i = 0$) к краю ($i = 64$) показано на рис. 7, из которого видно, что разность площадей двух соседних колец $\Delta F = F_{i+1} - F_i$ ($i = 1, \ldots, 65$) постоянна и равна 0.02π м^2.

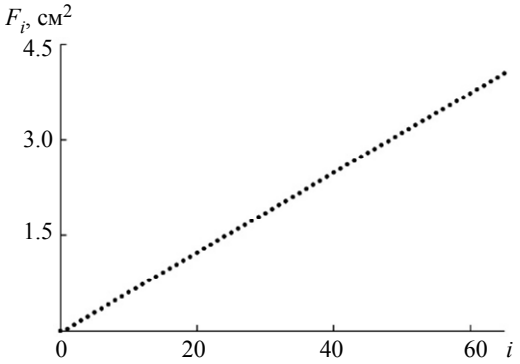
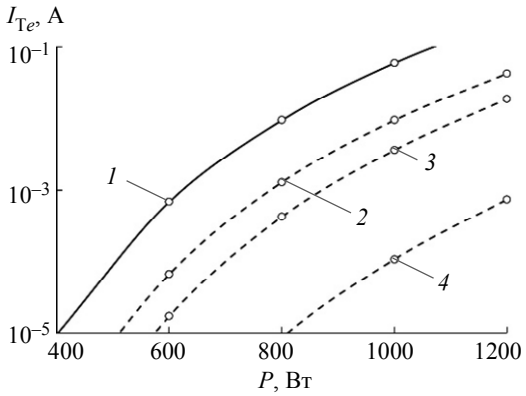


Рис. 7. Площади фрагментов модели нагретой поверхности мишени
Fig. 7. Areas of fragments of the model of the heated surface of the target



Диаметр мишени, мм:
1 – 130; *2* – 60; *3* – 80; *4* – 100

Рис. 9. Суммарный ток эмиссии из области поверхности горячей мишени. Вычисления выполнены с помощью дифференциальной (сплошная линия) и интегральной (штриховые линии) методик
Fig. 9. Total emission current from the surface area of a hot target. Calculations were performed using differential (solid line) and integral (dashed lines) methods

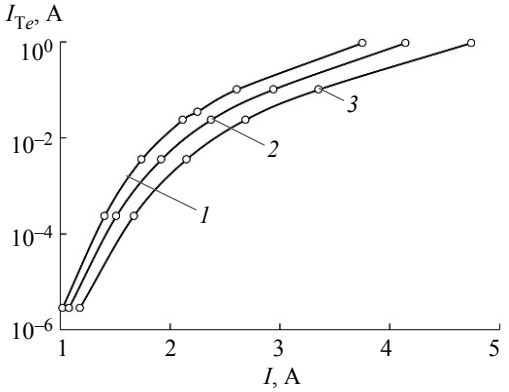


Рис. 10. Зависимость суммарного тока эмиссии горячей мишени диаметром 130 мм от тока разряда при давлении аргона (мторр): *1* – 2.0; *2* – 4.0; *3* – 6.0

Fig. 10. Dependence of the total emission current of a hot target with a diameter of 130 mm on the discharge current at argon pressure (mTorr): *1* – 2.0; *2* – 4.0; *3* – 6.0

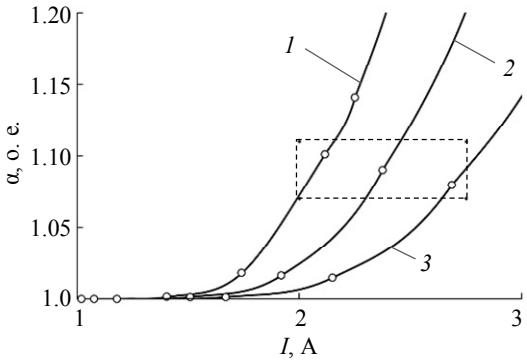


Рис. 11. Влияние тока разряда на относительную долю тока термоэлектронной эмиссии горячей титановой мишени при давлении аргона (мторр): *1* – 2.0; *2* – 4.0; *3* – 6.0

Fig. 11. Effect of discharge current on the relative share of thermionic emission current of a hot titanium target at argon pressure (mTorr): *1* – 2.0; *2* – 4.0; *3* – 6.0

Результаты, показанные на рис. 6 и 7, были использованы для вычисления тока термоэлектронной эмиссии для каждого *i*-го фрагмента модели. Вычисления были выполнены по преобразованной формуле (3):

$$I_{\mathrm{T}ei} = AF_iT_i^2 \exp\left(-\frac{e\varphi_t}{kT_i}\right). \qquad (13)$$

Результаты применения выражения (13) даны на рис. 8, который отражает распределение тока только на части мишени. Периферийные области (при $r > 45$ мм) нагреты слабо и дают малозначимый вклад в эмиссию тока. Конечным результатом предложенной методики служит суммарный ток эмиссии

$$I_{\mathrm{T}e} = \sum_{i=1}^{N-1} I_{\mathrm{T}ei}. \qquad (14)$$

Зависимости величины (14) от мощности разряда приведены на рис. 9, где кривая *1* отражает полный ток эмиссии внешней пластины, вычисленный с помощью дифференциальной методики. Характерно, что около 99 % этого тока эмиттирует центральная область пластины, имеющая диаметр 48 мм, которая занимает около 14 % ее общей площади. На рис. 9 приведены несколько зависимостей, характеризующих интегральную методику (штриховые линии). Каждая из них построена для области мишени, принятой в качестве эмиттера термоэлектронов и имеющей заданный диаметр. Рис. 9 для всех случаев иллюстрирует значительно заниженный ток эмиссии, который предсказывает интегральная методика.

Используем полученный результат в виде зависимости *1* на рис. 9 для анализа влияния термоэлектронной эмиссии на ВАХ разряда магнетрона с горячей титановой мишенью в инертной среде. Напомним, что при экспериментальном изучении разряда магнетрона в качестве независимых параметров нами использованы ток разряда и давление аргона (см. рис. 3, *а*). Установим связь результатов моделирования с реальным экспериментом. Для этого, используя рис. 3, *б*, преобразуем кривую *1* на рис. 9 в зависимость суммарного тока эмиссии от тока разряда и давления аргона.

На рис. 10 приведены полученные зависимости. Из рисунка видно, что при токе разряда более 4 А ток эмиссии внешней пластины может достигать значения около 1 А. Однако нас интересует область максимумов ВАХ, анализ которой выполним по относительному изменению тока (7), при значении $\gamma = 0.127$, характерном для титана [33]. Рис. 11 содержит результаты вычислений величины (7), где штриховым прямоугольником выделена область максимумов ВАХ, показанных на рис. 3, *а*. Как видно из рис. 11, в области токов разряда (2.0…3.0 А) ток термоэлектронной эмиссии нагретой пластины достигает значений порядка 10 % тока ионно-электронной эмиссии, что можно считать значимой величиной, инициирующей переход разряда в дуговую стадию. Из рис. 11 видно, что при увеличении давления положение максимума смещается вправо. Этот эффект очевидно связан с уменьшением температуры пластины из-за снижения мощности разряда (см. рис. 3, *б*).

Выводы. Установлено, что независимо от давления рабочего газа при увеличении тока воз-

никает переход разряда в дуговую стадию. Причиной этого эффекта является возрастание термоэлектронной эмиссии до значимого уровня. Для моделирования эмиссионного процесса использована дифференциальная методика. Она основана на известном латеральном распределении температуры поверхности мишени, для численной оценки которого был использован модуль «Теплопередача» пакета COMSOL Multiphysics. Характерно, что около 99 % этого тока эмитирует центральная область пластины, имеющая диаметр 48 мм, которая занимает около 14 % ее общей площади. При этом установлено, что интегральная оценка, основанная на усредненной оценке температуры области мишени, выбранной в качестве эмиттера, демонстрирует значительно заниженный ток эмиссии. Полученные результаты могут найти практическое применение при разработке технологии осаждения пленок металлов и их сплавов.

Список литературы

1. Влияние термообработки на структуру пленок диоксида титана / А. Е. Лапшин, О. В. Магдысюк, В. В. Плотников, В. И. Шаповалов, Н. С. Шутова // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36, № 20. С. 29–34.

2. Кристаллизация и термохромизм в отожженных гетероструктурах, содержащих пленки оксидов титана и вольфрама / В. И. Шаповалов, А. Е. Лапшин, А. Е. Комлев, М. Ю. Арсентьев, А. А. Комлев // ЖТФ. 2013. Т. 83, № 9. С. 73–83.

3. Кристаллизация и термохромизм в пленках оксида вольфрама, отожженных в вакууме / В. И. Шаповалов, А. Е. Лапшин, А. Е. Комлев, А. А. Комлев // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38, № 12. С. 8–16.

4. Preparation of amorphous TiO_2 films by RF magnetron sputtering: Process optimization and effect of sputtering pressure on electrochromic properties / L. Zhang, H. Liu, H. Chen, Y Chen., N. Li, C. Tan, H. Ma // Phys. B: Condens. Mat. 2025. Vol. 697(15). P. 416726. doi: 10.1016/j.physb.2024.416726.

5. The microstructure and mechanical properties of He charged Al films fabricated by HiPIMS/DCMS co-sputtering / Y. Liu, X. Ai, J. Huang, T. Wang, G. Chen, Z. He // Vacuum. 2023. Vol. 219. P. 112744. doi: 10.1016/j.vacuum.2023.112744.

6. Penning F. M. Coating by cathode disintegration. Patent US 2146025. 07.02.1939.

7. Kay E. Magnetic field effects on an abnormal truncated glow discharge and their relation to sputtered thin-film growth // J. Appl. Phys. 1963. Vol. 34(4). P. 760–768. doi: 10.1063/1.1729530.

8. Wasa K., Hayakawa Sh. Reactively sputtered titanium resistors, capacitors and rectifiers for microcircuits // Microelectr. Reliab. 1967. Vol. 6(3). P. 213–221. doi: 10.1016/0026-2714(67)90262-4.

9. Gill W. D., Kay E. Efficient low pressure sputtering in a large inverted magnetron suitable for film synthesis // Rev. Sci. Instrum. 1965. Vol. 36(3). P. 277–282. doi: 10.1063/1.1719553.

10. Wasa K., Hayakawa Sh. Low pressure sputtering system of the magnetron type // Rev. Sci. Instrum. 1969. Vol. 40(5). P. 693–697. doi: 10.1063/1.1684039.

11. Studying room temperature RF magnetron-sputtered indium tin oxide (ITO) thin films for large scale applications / M. I. Hossain, A. Salhi, A. Zekri, A. Abutaha, Y. Tong, S. A. Mansour // Res. Surf. Inter. 2024. Vol. 18. P. 100383. doi: 10.1016/j.rsurfi.2024.100383.

12. Tasyurek L. B., Kilinc N. Hydrogen detection and electrical properties of titanium silicate Schottky diode fabricated by RF-magnetron sputtering method // Intern. J. Hydrogen Energy Vol. 144(3). 2025. P. 738–745. doi: 10.1016/j.ijhydene.2025.03.135.

13. Impact of nitrogen concentration on the growth of h-AlN thin films using RF-magnetron sputtering for microwave applications / E. Radhika, S. Gone, S. Talari, K. Emmanuel, P. Dobbidi // Mater. Sci. Engin.: B. 2025. Vol. 317. P. 118226. doi: 10.1016/j.mseb.2025.118226.

14. A room-temperature RF magnetron sputtering synthesis of amorphous Bi_2O_3 films for self-powered UV photodetector / Y. Sun, X. Zhang, B. Sun, X. Hu, M. Zhang, Q. Gao, Q. Zhou, E. Zhu, Z. Ye, S. Gao // Mater. Sci. Semicond. Proc. 2025. Vol. 194(1). P. 109578. doi: 10.1016/j.mssp.2025.109578.

15. Influence of O_2 flow rate on the electrochemical hydrogen evolution reaction performance of Cu/Cu_2O/ Grade stainless steel prepared by RF magnetron sputtering / H. P. Pham, K. B. Nguyen, S. Y. Kim, H. H. Do // Inorgan. Chem. Commun. 2025. Vol. 178(2). P. 114597. doi: 10.1016/j.inoche.2025.114597.

16. Effect of oxygen flow rate on magnetron-sputtering-based preparation and photoelectric properties of vanadium dioxide films / Ch. Zhang, Y. Guo, Zh. Yang, L. Liu, K. Guo, J. Bai, H. Liu, Y. Xiao, L. Hu, Q. Hu, Q. Wang // Thin Solid Films. 2024. Vol. 809(1). P. 140595. doi: 10.1016/j.tsf.2024.140595.

17. Effects of nitrogen content on microstructure and mechanical properties of DC magnetron sputtered Cr-Mn-Mo-Si-Y-(N) high entropy coatings / L. Vrána, T. Stasiak, M. Fekete, V. Buršíková, Z. Czigány, K. Balázsi, P. Souček // Surf. Coat. Technol. 2025. Vol. 497(1). P. 131742. doi: 10.1016/j.surfcoat.2025.131742.

18. Dense and hard amorphous SiC coatings via non-reactive DC magnetron sputtering from alloy target: High thermal stability and oxidation resistance / L. Rassinfosse, E. Haye, P. Moskovkin, S. Lucas // J. Alloys Comp. 2025. Vol. 1028. P. 180695. doi: 10.1016/j.jallcom.2025.180695.

19. Preparation and physico-chemical characterization of AISI 304 stainless steel film deposited by DC magnetron sputtering / S. Tomko, J. Pechoušek, J. Tuček, E. Kuzmann, V. Heger, S. M. Dubiel, L. Machala // J. Magnet. Magnetic Mater. 2025. Vol. 628. P. 173210. doi: 10.1016/j.jmmm.2025.173210.

20. Effect of sputtering power on the structure and corrosion properties of DC magnetron sputtered Ni-Cr-Mo thin films / B. Assfour, B. Abdallah, A. W. Allaf, M. Kakhia // Inorgan. Chem. Commun. 2025. Vol. 176. P. 114304. doi: 10.1016/j.inoche.2025.114304.

21. Design of DC semi-industrial magnetron-sputtered W-Ti-N/Ag composite films: Insights into the microstructure and mechanical properties / J. Luan, Y. Wang, S. Dong, M. Evaristo, F. Fernandes, A. Cavaleiro, H. Ju // Surf. Coat. Technol. 2025. Vol. 502. P. 131942. doi: 10.1016/j.surfcoat.2025.131942.

22. Highly textured AlN films deposited by pulsed DC magnetron sputtering with optimized process parameters / V. R. Shayapov, A. L. Bogoslovtseva, S. Yu. Chepkasov, A. V. Kapishnikov, M. I. Mironova, P. V. Geydt // Solid State Comm. 2025. Vol. 397(1). P. 115821. doi: 10.1016/j.ssc.2024.115821.

23. High-temperature oxidation behavior of (TiZr NbMoTa)N high entropy ceramic coating for dry cutting tools / Ch. Wu, S. Yi, L. Xu, J. Jing, Y. Ling, W. Lu // Vacuum. 2024. Vol. 233. P. 113897. doi: 10.1016/j.vacuum.2024.113897.

24. Bobzin K., Kalscheuer C., Tayyab M. Influence of Cr + Si content variation on cutting behavior of TiAlCrSiN HPPMS coatings // Surf. Coat. Technol. 2024. Vol. 483. P. 130783. doi: 10.1016/j.surfcoat.2024.130783.

25. Deformation behavior of high Al content CrAlON coatings with varying oxygen content / K. Bobzin, Ch. Kalscheuer, M. P. Möbius, P. H. Aghdam // Surf. Coat. Technol. 2025. Vol. 496. P. 131639. doi: 10.1016/j.surfcoat.2024.131639.

26. Research on the influence of the off-target mechanism of DPPMS and HPPMS coating particles on the microstructure and properties of TiN coatings / J. Hao, M. Yang, Q. Fei, Y. Du, R. Zhou, J. Zhang, C. Yan, D. Wang // J. Mater. Res. Technol. 2025. Vol. 37. P. 575-582. doi: 10.1016/j.jmrt.2025.06.010.

27. Stoichiometric Cr_2AlC MAX phase coatings deposited by HPPMS from composite targets using industrial deposition technology / Y.-P. Chien, S. Mráz, C. Azina, S. Kolozsvári, P. Polcik, J. M. Schneider // Open Ceram. 2024. Vol. 17(12). P. 100538. doi: 10.1016/j.oceram.2024.100538.

28. Epitaxial growth of TiZrNbTaN films without external heating by high-power impulse magnetron sputtering / S. K. Honnali, R. Boyd, R. Magnusson, A. le Febvrier, D. Lundin, G. Greczynski, P. Eklund // Surf. Coat. Technol. 2025. Vol. 495(1). P. 131583. doi: 10.1016/j.surfcoat.2024.131583.

29. Research on electromagnetic shielding performance of aluminum coatings on carbon fiber composite material by HiPIMS / J. Xu, J. Zhang, C. Wang, J. Wang, Y. Liang, Y. Ma, J. Lei // Vacuum 2025. Vol. 239. P. 114379. doi: 10.1016/j.vacuum.2025.114379

30. Sensitivity analysis of various physics processes in industrial HiPIMS: A global plasma modeling perspective / K. Tomanková, K. Mrózek, A. Obrusník, A. Fromm, F. Burmeister // Surf. Coat. Technol. 2025. Vol. 507. P. 132126. doi: 10.1016/j.surfcoat.2025.132126.

31. Quasi-industrial accelerated testing of a HIPIMS deposited nano-layered CrAlYN/CrN coating for improving hot forging die life of nitrided H13 steel / C. Fleming, W. Kerr, B. Krishnamurthy, L. Hall, A. Sugumaran, A. Ehiasarian, P. Hovsepian // J. Manufact. Proc. 2025. Vol. 143. P. 132–150. doi: 10.1016/j.jmapro.2025.03.106.

32. Mechanical properties of DCMS and HiPIMS deposited $Ti_{1-x}Mo_xB_{2\pm z}$ coatings / A. Hirle, P. Dörflinger, C. Fuger, C. Gutschka, T. Wojcik, M. Podsednik, A. Limbeck, S. Kolozsvári, P. Polcik, C. Jerg, H. Riedl, R. Hahn // Surf. Coat. Technol. 2025 Vol. 497. P. 131750. doi: 10.1016/j.surfcoat.2025.131750.

33. Simulation of the effect of argon pressure on thermal processes in the sputtering unit of a magnetron with a hot target / V. I. Shapovalov, H. Ahmedov, A. A. Kozin, A. Demir, B. Korutlu // Vacuum. 2021. Vol. 192. P. 110421. doi: 10.1016/j.vacuum.2021.110421.

34. Properties of Ti-oxide thin films grown in reactive magnetron sputtering with self-heating target / R. Graillot-Vuillecot, A.-L. Thomann, T. Lecas, C. Cachoncinlle, E. Millon, A. Caillard // Vacuum. 2022. Vol. 197. P. 110813. doi: 10.1016/j.vacuum.2021.110813.

35. Моделирование химического состояния поверхности мишени в СИМР с горячей мишенью / А. В. Казиев, Д. В. Колодко, А. В. Тумаркин, М. М. Харьков, В. Ю. Лисенков // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2023. Т. 66. Вып. 12. С. 76–81.

36. Шаповалов В. И. Горячая мишень. Физико-химическая модель реактивного распыления // ЖТФ. 2019. Т. 89, № 7. С. 984–991. doi: 10.21883/JTF.2019.07.47785.228-18.

37. Surface temperature of a 2 in. Ti target during DC magnetron sputtering / C. Ramos, D. S. Jacobo-Mora, J. Cruz, S. Muhl // J. Vac. Sci. Technol. A. 2024. Vol. 42(3). P. 033002. doi: 10.1116/6.0003481.

38. Influence of the target temperature on a reactive sputtering process / A. Billard, D. Mercs, F. Perry, C. Frantz // Sur. Coat. Technol. 1999. Vol. 116–119. P. 721–726. doi: 10.1016/S0257-8972(99)00261-3.

39. Musil J., Satava V., Baroch P. High-rate deposition of transparent SiO_2 films containing low amount of Zr from molten magnetron target // Thin Solid Films. 2010. Vol. 519(2). P. 775–777. doi: 10.1016/j.tsf.2010.09.009.

40. Tesař J., Martan J., Rezek J. On surface temperatures during high power pulsed magnetron sputtering using a hot target // Sur. Coat. Technol. 2011. Vol. 206(6). P. 1155–1159. doi: 10.1016/j.surfcoat.2011.08.005.

41. Шаповалов В. И. Моделирование реактивного распыления. Основные принципы // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2024. Т. 17, № 7. С. 23–34. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-7-23.

42. Bondarenko A. S., Kolomiytsev A. A, Shapovalov V. I. The target heating influence on the reactive magnetron sputtering process // J. Phys.: Conf. Ser. 2016. Vol. 729(1). P. 012006. doi: 10.1088/1742-6596/729/1/012006.

43. Shapovalov V. I., Karzin V. V., Bondarenko A. S. Physicochemical model for reactive sputtering of hot target // Phys. Lett. A. 2017. Vol. 381. P. 472–475. doi: 10.1016/j.physleta.2016.11.028.

44. Shapovalov V. I., Minzhulina E. A. Studying heating of magnetron target based on measurement of substrate temperature // Vacuum. 2019. Vol. 161. P. 324–327. doi: 10.1016/j.vacuum.2019.01.001.

45. Hot target magnetron sputtering process: Effect of infrared radiation on the deposition of titanium and titanium oxide thin films / R. Graillot-Vuillecot, A.-L. Thomann, T. Lecas, C. Cachoncinlle, E. Millon, A. Caillard // Vacuum. 2020. Vol. 181(11). P. 109734. doi: 10.1016/j.vacuum.2020.109734.

46. Rossnagel S. M., Kaufman H. R. Current–voltage relations in magnetrons // J. Vac. Sci. Technol. A. 1988. Vol. 6. P. 223–229. doi: 10.1116/1.574985.

47. Shapovalov V. I., Zav'yalov A. V., Meleshko A. A. Current-voltage characteristics of a magnetron with a hot titanium target in chemically active environments // Sur. Coat. Technol. 2021. Vol. 417. P. 127189. doi: 10.1016/j.surfcoat.2021.127189.

48. Kozin A. A., Shapovalov V. I. Modeling of thermal processes in magnetron with single hot target and «sandwich-target» // Sur. Coat. Technol. 2019. V. 359. P. 451–458. doi: 10.1016/j.surfcoat.2018.12.070.

49. Shapovalov V. I., Minzhulina E. A., Smirnov V. V. Current-voltage characteristics of magnetron with hot target // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2018. Vol. 387(1). P. 012069. doi: 10.1088/1757-899X/387/1/012069.

Информация об авторах

Шаповалов Виктор Иванович – д-р техн. наук, профессор кафедры физической электроники и технологии СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Почетный работник высшего профессионального образования РФ.
E-mail: vishapovalov@mail.ru
https://orcid.org/0000-0003-2196-6851

Шарковский Даниил Сергеевич – аспирант кафедры электронных приборов и устройств СПбГЭТУ «ЛЭТИ».
E-mail: sharkovskiy.d@yandex.ru

References

1. Vlijanie termoobrabotki na strukturu plenok dioksida titana / A. E. Lapshin, O. V. Magdysjuk, V. V. Plotnikov, V. I. Shapovalov, N. S. Shutova // Pis'ma v ZhTF. 2010. T. 36, № 20. S. 29–34. (In Russ.).

2. Kristallizacija i termohromizm v otozhzhennyh geterostrukturah, soderzhashhih plenki oksidov titana i vol'frama / V. I. Shapovalov, A. E Lapshin, A. E. Komlev, M. Ju. Arsent'ev, A. A. Komlev // ZhTF. 2013. T. 83, № 9. S. 73–83. (In Russ.).

3. Kristallizacija i termohromizm v plenkah oksida vol'frama, otozhzhennyh v vakuume / V. I. Shapovalov, A. E. Lapshin, A. E. Komlev, A. A. Komlev // Pis'ma v ZhTF. 2012. T. 38, № 12. S. 8–16. (In Russ.).

4. Preparation of amorphous TiO_2 films by RF magnetron sputtering: Process optimization and effect of sputtering pressure on electrochromic properties / L. Zhang, H. Liu, H. Chen, Y Chen., N. Li, C. Tan, H. Ma // Phys. B: Condens. Mat. 2025. Vol. 697(15). P. 416726. doi: 10.1016/j.physb.2024.416726.

5. The microstructure and mechanical properties of He charged Al films fabricated by HiPIMS/DCMS co-sputtering / Y. Liu, X. Ai, J. Huang, T. Wang, G. Chen, Z. He // Vacuum. 2023. Vol. 219. P. 112744. doi: 10.1016/j.vacuum.2023.112744.

6. Penning F. M. Coating by cathode disintegration. Patent US 2146025. 07.02.1939.

7. Kay E. Magnetic field effects on an abnormal truncated glow discharge and their relation to sputtered thin-film growth // J. Appl. Phys. 1963. Vol. 34(4). P. 760–768. doi: 10.1063/1.1729530.

8. Wasa K., Hayakawa Sh. Reactively sputtered titanium resistors, capacitors and rectifiers for microcircuits // Microelectr. Reliab. 1967. Vol. 6(3). P. 213–221. doi: 10.1016/0026-2714(67)90262-4.

9. Gill W. D., Kay E. Efficient low pressure sputtering in a large inverted magnetron suitable for film synthesis // Rev. Sci. Instrum. 1965. Vol. 36(3). P. 277–282. doi: 10.1063/1.1719553.

10. Wasa K., Hayakawa Sh. Low pressure sputtering system of the magnetron type // Rev. Sci. Instrum. 1969. Vol. 40(5). P. 693–697. doi: 10.1063/1.1684039.

11. Studying room temperature RF magnetron-sputtered indium tin oxide (ITO) thin films for large scale applications / M. I. Hossain, A. Salhi, A. Zekri, A. Abutaha, Y. Tong, S. A. Mansour // Res. Surf. Inter. 2024. Vol. 18. P. 100383. doi: 10.1016/j.rsurfi.2024.100383.

12. Tasyurek L. B., Kilinc N. Hydrogen detection and electrical properties of titanium silicate Schottky diode fabricated by RF-magnetron sputtering method // Intern. J. Hydrogen Energy Vol. 144(3). 2025. P. 738–745. doi: 10.1016/j.ijhydene.2025.03.135.

13. Impact of nitrogen concentration on the growth of h-AlN thin films using RF-magnetron sputtering for microwave applications / E. Radhika, S. Gone, S. Talari, K. Emmanuel, P. Dobbidi // Mater. Sci. Engin.: B. 2025. Vol. 317. P. 118226. doi: 10.1016/j.mseb.2025.118226.

14. A room-temperature RF magnetron sputtering synthesis of amorphous Bi_2O_3 films for self-powered UV photodetector / Y. Sun, X. Zhang, B. Sun, X. Hu, M. Zhang, Q. Gao, Q. Zhou, E. Zhu, Z. Ye, S. Gao // Mater. Sci. Semicond. Proc. 2025. Vol. 194(1). P. 109578. doi: 10.1016/j.mssp.2025.109578.

15. Influence of O_2 flow rate on the electrochemical hydrogen evolution reaction performance of Cu/Cu_2O/

Grade stainless steel prepared by RF magnetron sputtering / H. P. Pham, K. B. Nguyen, S. Y. Kim, H. H. Do // Inorgan. Chem. Commun. 2025. Vol. 178(2). P. 114597. doi: 10.1016/j.inoche.2025.114597.

16. Effect of oxygen flow rate on magnetron-sputtering-based preparation and photoelectric properties of vanadium dioxide films / Ch. Zhang, Y. Guo, Zh. Yang, L. Liu, K. Guo, J. Bai, H. Liu, Y. Xiao, L. Hu, Q. Hu, Q. Wang // Thin Solid Films. 2024. Vol. 809(1). P. 140595. doi: 10.1016/j.tsf.2024.140595.

17. Effects of nitrogen content on microstructure and mechanical properties of DC magnetron sputtered Cr-Mn-Mo-Si-Y-(N) high entropy coatings / L. Vrána, T. Stasiak, M. Fekete, V. Buršíková, Z. Czigány, K. Balázsi, P. Souček // Surf. Coat. Technol. 2025. Vol. 497(1). P. 131742. doi: 10.1016/j.surfcoat.2025.131742.

18. Dense and hard amorphous SiC coatings via non-reactive DC magnetron sputtering from alloy target: High thermal stability and oxidation resistance / L. Rassinfosse, E. Haye, P. Moskovkin, S. Lucas // J. Alloys Comp. 2025. Vol. 1028. P. 180695. doi: 10.1016/j.jallcom.2025.180695.

19. Preparation and physico-chemical characterization of AISI 304 stainless steel film deposited by DC magnetron sputtering / S. Tomko, J. Pechoušek, J. Tuček, E. Kuzmann, V. Heger, S. M. Dubiel, L. Machala // J. Magnet. Magnetic Mater. 2025. Vol. 628. P. 173210. doi: 10.1016/j.jmmm.2025.173210.

20. Effect of sputtering power on the structure and corrosion properties of DC magnetron sputtered Ni-Cr-Mo thin films / B. Assfour, B. Abdallah, A. W. Allaf, M. Kakhia // Inorgan. Chem. Commun. 2025. Vol. 176. P. 114304. doi: 10.1016/j.inoche.2025.114304.

21. Design of DC semi-industrial magnetron-sputtered W-Ti-N/Ag composite films: Insights into the microstructure and mechanical properties / J. Luan, Y. Wang, S. Dong, M. Evaristo, F. Fernandes, A. Cavaleiro, H. Ju // Surf. Coat. Technol. 2025. Vol. 502. P. 131942. doi: 10.1016/j.surfcoat.2025.131942.

22. Highly textured AlN films deposited by pulsed DC magnetron sputtering with optimized process parameters / V. R. Shayapov, A. L. Bogoslovtseva, S. Yu. Chepkasov, A. V. Kapishnikov, M. I. Mironova, P. V. Geydt // Solid State Comm. 2025. Vol. 397(1). P. 115821. doi: 10.1016/j.ssc.2024.115821.

23. High-temperature oxidation behavior of (TiZr NbMoTa)N high entropy ceramic coating for dry cutting tools / Ch. Wu, S. Yi, L. Xu, J. Jing, Y. Ling, W. Lu // Vacuum. 2024. Vol. 233. P. 113897. doi: 10.1016/j.vacuum.2024.113897.

24. Bobzin K., Kalscheuer C., Tayyab M. Influence of Cr + Si content variation on cutting behavior of TiAlCrSiN HPPMS coatings // Surf. Coat. Technol. 2024. Vol. 483. P. 130783. doi: 10.1016/j.surfcoat.2024.130783.

25. Deformation behavior of high Al content CrAlON coatings with varying oxygen content / K. Bobzin, Ch. Kalscheuer, M. P. Möbius, P. H. Aghdam // Surf. Coat. Technol. 2025. Vol. 496. P. 131639. doi: 10.1016/j.surfcoat.2024.131639.

26. Research on the influence of the off-target mechanism of DPPMS and HPPMS coating particles on the microstructure and properties of TiN coatings / J. Hao, M. Yang, Q. Fei, Y. Du, R. Zhou, J. Zhang, C. Yan, D. Wang // J. Mater. Res. Technol. 2025. Vol. 37. P. 575–582. doi: 10.1016/j.jmrt.2025.06.010.

27. Stoichiometric Cr_2AlC MAX phase coatings deposited by HPPMS from composite targets using industrial deposition technology / Y.-P. Chien, S. Mráz, C. Azina, S. Kolozsvári, P. Polcik, J. M. Schneider // Open Ceram. 2024. Vol. 17(12). P. 100538. doi: 10.1016/j.oceram.2024.100538.

28. Epitaxial growth of TiZrNbTaN films without external heating by high-power impulse magnetron sputtering / S. K. Honnali, R. Boyd, R. Magnusson, A. le Febvrier, D. Lundin, G. Greczynski, P. Eklund // Surf. Coat. Technol. 2025. Vol. 495(1). P. 131583. doi: 10.1016/j.surfcoat.2024.131583.

29. Research on electromagnetic shielding performance of aluminum coatings on carbon fiber composite material by HiPIMS / J. Xu, J. Zhang, C. Wang, J. Wang, Y. Liang, Y. Ma, J. Lei // Vacuum 2025. Vol. 239. P. 114379. doi: 10.1016/j.vacuum.2025.114379

30. Sensitivity analysis of various physics processes in industrial HiPIMS: A global plasma modeling perspective / K. Tomanková, K. Mrózek, A. Obrusník, A. Fromm, F. Burmeister // Surf. Coat. Technol. 2025. Vol. 507. P. 132126. doi: 10.1016/j.surfcoat.2025.132126.

31. Quasi-industrial accelerated testing of a HIPIMS deposited nano-layered CrAlYN/CrN coating for improving hot forging die life of nitrided H13 steel / C. Fleming, W. Kerr, B. Krishnamurthy, L. Hall, A. Sugumaran, A. Ehiasarian, P. Hovsepian // J. Manufact. Proc. 2025. Vol. 143. P. 132–150. doi: 10.1016/j.jmapro.2025.03.106.

32. Mechanical properties of DCMS and HiPIMS deposited $Ti_{1-x}Mo_xB_{2\pm z}$ coatings / A. Hirle, P. Dörflinger, C. Fuger, C. Gutschka, T. Wojcik, M. Podsednik, A. Limbeck, S. Kolozsvári, P. Polcik, C. Jerg, H. Riedl, R. Hahn // Surf. Coat. Technol. 2025 Vol. 497. P. 131750. doi: 10.1016/j.surfcoat.2025.131750.

33. Simulation of the effect of argon pressure on thermal processes in the sputtering unit of a magnetron with a hot target / V. I. Shapovalov, H. Ahmedov, A. A. Kozin, A. Demir, B. Korutlu // Vacuum. 2021. Vol. 192. P. 110421. doi: 10.1016/j.vacuum.2021.110421.

34. Properties of Ti-oxide thin films grown in reactive magnetron sputtering with self-heating target / R. Braillot-Vuillecot, A.-L. Thomann, T. Lecas, C. Cachoncinlle, E. Millon, A. Caillard // Vacuum. 2022. Vol. 197. P. 110813. doi: 10.1016/j.vacuum.2021.110813.

35. Modelirovanie himicheskogo sostojanija poverhnosti misheni v SIMR s gorjachej mishen'ju / A. V. Kaziev, D. V. Kolodko, A. V. Tumarkin, M. M. Har'kov, V. Ju. Lisenkov // Izv. vuzov. Himija i him. tehnologija. 2023. T. 66. Vyp. 12. S. 76–81. (In Russ.).

36. Shapovalov V. I. Gorjachaja mishen'. Fiziko-himicheskaja model' reaktivnogo raspylenija // ZhTF. 2019. T. 89, № 7. S. 984–991. doi: 10.21883/JTF.2019.07.47785.228-18. (In Russ.).

37. Surface temperature of a 2 in. Ti target during DC magnetron sputtering / C. Ramos, D. S. Jacobo-Mora, J. Cruz, S. Muhl // J. Vac. Sci. Technol. A. 2024. Vol. 42(3). P. 033002. doi: 10.1116/6.0003481.

38. Influence of the target temperature on a reactive sputtering process / A. Billard, D. Mercs, F. Perry, C. Frantz // Sur. Coat. Technol. 1999. Vol. 116–119. P. 721–726. doi: 10.1016/S0257-8972(99)00261-3.

39. Musil J., Satava V., Baroch P. High-rate deposition of transparent SiO_2 films containing low amount of Zr from molten magnetron target // Thin Solid Films. 2010. Vol. 519(2). P. 775–777. doi: 10.1016/j.tsf.2010.09.009.

40. Tesař J., Martan J., Rezek J. On surface temperatures during high power pulsed magnetron sputtering using a hot target // Sur. Coat. Technol. 2011. Vol. 206(6). P. 1155–1159. doi: 10.1016/j.surfcoat.2011.08.005.

41. Shapovalov V. I. Modelirovanie reaktivnogo raspylenija. Osnovnye principy // Izv. SPbGJeTU «LJeTI». 2024. T. 17, № 7. S. 23–34. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-7-23. (In Russ.).

42. Bondarenko A. S., Kolomiytsev A. A, Shapovalov V. I. The target heating influence on the reactive magnetron sputtering process // J. Phys.: Conf. Ser. 2016. Vol. 729(1). P. 012006. doi: 10.1088/1742-6596/729/1/012006.

43. Shapovalov V. I., Karzin V. V., Bondarenko A. S. Physicochemical model for reactive sputtering of hot target // Phys. Lett. A. 2017. Vol. 381. P. 472–475. doi: 10.1016/j.physleta.2016.11.028.

44. Shapovalov V. I., Minzhulina E. A. Studying heating of magnetron target based on measurement of substrate temperature // Vacuum. 2019. Vol. 161. P. 324–327. doi: 10.1016/j.vacuum.2019.01.001.

45. Hot target magnetron sputtering process: Effect of infrared radiation on the deposition of titanium and titanium oxide thin films / R. Graillot-Vuillecot, A.-L. Thomann, T. Lecas, C. Cachoncinlle, E. Millon, A. Caillard // Vacuum. 2020. Vol. 181(11). P. 109734. doi: 10.1016/j.vacuum.2020.109734.

46. Rossnagel S. M., Kaufman H. R. Current-voltage relations in magnetrons // J. Vac. Sci. Technol. A. 1988. Vol. 6. P. 223–229. doi: 10.1116/1.574985.

47. Shapovalov V. I., Zav'yalov A. V., Meleshko A. A. Current-voltage characteristics of a magnetron with a hot titanium target in chemically active environments // Sur. Coat. Technol. 2021. Vol. 417. P. 127189. doi: 10.1016/j.surfcoat.2021.127189.

48. Kozin A. A., Shapovalov V. I. Modeling of thermal processes in magnetron with single hot target and «sandwich-target» // Sur. Coat. Technol. 2019. Vol. 359. P. 451–458. doi: 10.1016/j.surfcoat.2018.12.070.

49. Shapovalov V. I., Minzhulina E. A., Smirnov V. V. Current-voltage characteristics of magnetron with hot target // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2018. Vol. 387(1). P. 012069. doi: 10.1088/1757-899X/387/1/012069.

Information about the authors

Viktor I. Shapovalov – Dr Sci. (Eng.), Professor of the Department of Physical Electronics and Technology, Saint Petersburg Electrotechnical University. Honorary Worker of Higher Professional Education of the Russian Federation.
E-mail: vishapovalov@mail.ru
https://orcid.org/0000-0003-2196-6851

Daniil S. Sharkovskii – postgraduate student of the Department of Electronic Devices and Instruments, Saint Petersburg Electrotechnical University.
E-mail: sharkovskiy.d@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 24.04.2025; принята к публикации после рецензирования 30.06.2025; опубликована онлайн 30.10.2025.

Submitted 24.04.2025; accepted 30.06.2025; published online 30.10.2025.